

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

GUSTAVO RIBEIRO BARZOTTO

APLICAÇÃO LOCALIZADA DE SILÍCIO NA CULTURA DO TRIGO

CHAPADÃO DO SUL – MS
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

GUSTAVO RIBEIRO BARZOTTO

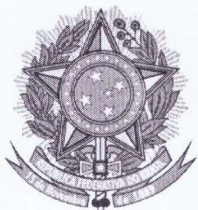
APLICAÇÃO LOCALIZADA DE SILÍCIO NA CULTURA DO TRIGO

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cassia Félix Alvarez

Co- Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia, área
de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS
2019



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Campus de Chapadão do Sul



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Gustavo Ribeiro Barzotto

ORIENTADOR (A): Prof. (a) Dr. (a) Rita de Cassia Felix Alvarez

APLICAÇÃO LOCALIZADA DE SILÍCIO NA CULTURA DO TRIGO

Prof.(a) Dr.(a) Presidente Rita de Cassia Felix Alvarez

Prof.(a) Dr.(a) Eduardo Pradi Vendruscolo

Prof.(a) Dr.(a) Sebastião Ferreira de Lima

Chapadão do Sul, 15 de Fevereiro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Eraldo Mendes Barzotto e Luiza Ribeiro Barzotto.

Dedico a minha orientadora Rita de Cassia Félix Alvarez e ao co-orientador Renato de Mello Prado, que me proporcionaram a experiência deste trabalho.

Sem o apoio de ambos, este trabalho não teria sido realizado

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me proporcionaram este período de aperfeiçoamento pessoal e profissional, sempre acreditando na educação como maior herança a se deixar.

Aos meus amigos de graduação e pós-graduação, que me ajudaram não apenas a realizar este trabalho, mas em todo o processo de transformação profissional.

Em especial aos amigos Mayara Santana Zanella que esteve ao meu lado durante todo a execução do estudo, e Osvaldir Feliciano dos Santos, Gabriel Luiz Piatí e Irineu Eduardo Kühn pois estiveram desde o início da graduação e percorrem novamente o trajeto da educação.

Aos meus irmãos e sobrinho, que embora distantes, nunca deixaram de torcer por mim.

Ao colega de profissão Jonas Pereira de Souza Junior, doutorando em Engenharia Agrônômica pela FCAV/UNESP, pela gentileza em realizar as análises do potássio e contribuir para este estudo.

Aos professores que fizeram parte deste processo, principalmente a minha orientadora Rlta, ao professor Sebastião e ao professor Cassiano, que me ensinaram e dedicaram algum tempo para me ajudar.

EPÍGRAFE

"A experiência é o nome que damos para nossos erros. "

Oscar Wilde

RESUMO

BARZOTTO, Gustavo Ribeiro. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
Aplicação localizada de silício na cultura do trigo.
Professora Orientadora: Rita de Cassia Félix Alvarez

O silício como alternativa para potencializar mecanismos bioquímicos e estruturais das plantas tem sido estudado com resultados promissores. Objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de doses de nanosílica e silicato de sódio no teor de silício e variáveis nutricionais e fisiológicas da cultura do trigo. O experimento foi conduzido em ambiente protegido e em vasos, com delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, no fatorial 2 x 4, sendo fontes (nanosílica e silicato de sódio) e doses de silício (0, 150, 300 e 450 g ha⁻¹). Foram avaliados o teor foliar de silício, nitrogênio, fósforo e potássio e a fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração de plantas de trigo. A nanosílica aumentou o teor foliar de silício, nitrogênio e fósforo em 59%, 9,3% e 5%, respectivamente, mas reduziu a fotossíntese em até 29% em relação ao controle. Conclui-se que as fontes testadas promovem maior teor foliar de Si para o trigo, com destaque para a nanosílica. O fornecimento de nanosílica proporciona maior teor foliar de nitrogênio e fósforo, ao contrário do silicato de sódio, mas não altera o teor de potássio. No entanto um alto teor deste elemento limita a condutância estomática e a transpiração, reduzindo a fotossíntese.

PALAVRAS-CHAVE: Elemento benéfico. Fotossíntese. Nanosílica

ABSTRACT

BARZOTTO, Gustavo Ribeiro. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Silicon applied to wheat seeding furrows.

Author: Gustavo Ribeiro Barzotto

Adviser: Rita de Cassia Felix Alvarez

Silicon as an alternative to potentiate plant metabolism has been studied with promising results. The aim was to evaluate the effect of nanosilica and sodium silicate applied in the furrow on the silicon content and nutritional and physiological parameters. The experiment was conducted under protected environment in pots and consisted of a randomized blocks design and four replicates, 2 x 4 factorial was used, corresponding to sources (nanosilica and sodium silicate) and doses (0, 150, 300 and 450 g ha⁻¹). Were evaluated the silicon, nitrogen, phosphorus and potassium leaf content and photosynthesis, stomatal conductance and transpiration of wheat plants. The nanosilica increased the silicon, nitrogen and phosphorus leaf content in 59%, 9,3% and 5% respectively, but reduced the photosynthesis by 29% in relation to control. Was concluded that the sources tested provide bigger silicon leaf content, in particular the nanosilica. The nanosilica supply provide bigger nitrogen and phosphorus leaf content, instead the sodium silicate, but doesn't change the potassium content. However, a great silicon content limits the stomatal conductance and transpiration reducing the photosynthesis.

KEY-WORDS: Beneficial element. Photosynthesis. Nanosilica

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA		PÁGINA
1	Temperaturas máxima, mínima e umidade relativa do ar durante o período de cultivo. Chapadão do Sul.....	15
2	Teor de silício em folhas de trigo sob fornecimento de doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	18
3	Teor de nitrogênio em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	18
4	Teor de fósforo em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	19
5	Teor de potássio em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	20
6	Taxa de fotossíntese líquida de plantas de trigo sob fornecimento de doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	20
7	Condutância estomática de plantas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	21
8	Transpiração de plantas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Trigo no cerrado	3
2.2 Silício como elemento benéfico para plantas	3
2.3 Silício na nutrição do trigo	4
3. REFERÊNCIAS	6
APLICAÇÃO LOCALIZADA DE SILÍCIO NA CULTURA DO TRIGO	
RESUMO.....	11
ABSTRACT	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
3. RESULTADOS	17
4. DISCUSSÃO	22
5. REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

O cultivo do trigo no cerrado sul mato-grossense pode ser estratégia para a diversificação da produção aliadas a práticas mais sustentáveis, como a rotação de culturas, permitindo também retorno econômico (SILVA, 2001). Com a crescente demanda no consumo de trigo, as áreas do Brasil Central passaram a ser consideradas como produtoras em potencial, graças ao desenvolvimento de materiais adaptados (SILVA et al., 2008).

As variedades de trigo para as regiões centrais do Brasil são altamente produtivas (FELÍCIO, 1996). No entanto, para atender exigências de mercado, o cereal deve proporcionar também características interessantes para a indústria (BORDES et al., 2011). Uma estratégia que pode ser utilizada para beneficiar as plantas de trigo é a adubação silicatada.

O silício (Si) é o segundo elemento mais encontrado na crosta terrestre (MA; YAMAJI, 2006), no entanto no solo ele está retido nas rochas e minerais ou, após intemperização destas, na solução do solo, na forma de ácido monossilício, muito sujeito a lixiviação (MCKEAGUE; CLINE, 1963). Dessa forma sua disponibilidade para as plantas é limitada, principalmente pelo grau de intemperismo do solo.

O Si é considerado um elemento benéfico, não essencial para as plantas (KERBAUY, 2012). Por isso nem todas elas são capazes de absorve-lo. A capacidade de absorção é regulada pela transcrição de genes que permitem proteínas fazerem seu transporte (MA; YAMAJI, 2006).

Os benefícios do uso do Si pelas plantas relacionam-se principalmente pela característica de se depositar nas paredes celulares de células epidérmicas. (GAO et al., 2006). Isso pode ser vantajoso para obter melhor arquitetura de folhas em relação a absorção de radiação solar (EPSTEIN, 1999) como também na menor transpiração vegetal, o que confere maior resistência hídrica (ÁVILA et al., 2010).

O Si ainda está envolvido em outros processos metabólicos das plantas, como o estímulo à produção de antioxidantes (AHMED et al., 2016), melhoria no processo enzimático da fotossíntese (AL-AGHABARY, et al., 2005) e modificações no conteúdo e balanço nutricional (NEU et al., 2017). Dessa

34 forma o estudo do fornecimento desse elemento para as plantas e as respostas
35 metabólicas são recomendadas.

36 A utilização de fontes solúveis que possam ser facilmente disponibilizadas
37 para as plantas é interessante visto que a fonte mais comum de Si para a
38 agricultura é o silicato de cálcio, proveniente de resíduos industriais, e muitas
39 vezes contaminado por metais pesados (PRADO et al., 2001). No entanto,
40 comportamento do Si no solo é problemático, pois quando aplicado em altas
41 concentrações tende a polimerizar-se e tornar-se indisponível (KORNDÖRFER
42 et al., 1999).

43 Dessa forma, o fornecimento localizado de Si pode ser suficiente e eficaz,
44 com a utilização de baixas doses. Como alternativa, as nanopartículas de Si
45 provenientes de fontes sustentáveis como a casca de arroz para serem
46 testadas com fontes já mais difundidas como o silicato de sódio.

47 Este trabalho considera que o Si pode ser fornecido para a cultura do trigo
48 no sulco de plantio em baixas doses, e que seu acúmulo nos tecidos resulta em
49 mudanças nos aspectos nutricionais e fisiológicos da cultura. Dessa forma,
50 objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de doses de nanosílica e silicato de
51 sódio no teor de Si e variáveis nutricionais e fisiológicas da cultura do trigo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Trigo no cerrado

O cultivo de grãos no cerrado tem como culturas principais a soja e o milho, com este concentrando-se principalmente em segunda safra. Ao longo dos anos, verificou-se a necessidade de diversificação da produção, com a inserção de diferentes culturas, de modo a melhorar tanto agronomicamente quanto economicamente o sistema agrícola produtivo (SILVA, 2001).

Com a crescente demanda no consumo de trigo, as áreas do Brasil Central passaram a ser consideradas como produtoras em potencial, enfrentando inicialmente dificuldades com adaptações de cultivares (SILVA et al., 2008). Com o investimento de centros nacionais de pesquisa, esse problema foi superado, com o desenvolvimento de materiais genéticos adaptados com elevada produtividade (FELÍCIO, 1996). No entanto, para atender exigências de mercado, o cereal deve proporcionar também características interessantes para a indústria (BORDES et al., 2011).

O trigo produzido no cerrado normalmente apresenta boa qualidade industrial (CONAB, 2017a), especialmente para panificação (ALBRECHT et al., 2006). Este autor ainda afirma que as variedades indicadas para essa região são do tipo pão e melhorador, da mais alta qualidade produzida no país além de que, sob regime de irrigação, pode-se obter produtividades em torno de 7 Mg ha⁻¹.

Ainda assim, há muitos desafios para sua produção. Em Mato Grosso do Sul, segundo levantamento da Conab (2017b), os principais problemas enfrentados pelos produtores são as altas temperaturas e falta de água durante a floração. Problemas fitossanitários também são comuns, como doenças causadas por fungos, como a brusone e a giberela, que são recorrentes em todas as regiões produtoras do país.

2.2 Silício como elemento benéfico para plantas

O silício não é considerado um elemento essencial para as plantas (EPSTEIN, 1999), no entanto, é tido como benéfico (MA, 2004). Presente em abundância na crosta terrestre, é encontrado predominantemente, na solução

do solo na forma de ácido monossilícico [Si(OH)₄] (KERBAUY, 2012), sendo absorvido por mecanismo ativo nas plantas (MALAVOLTA, 2006).

Diversas espécies de plantas tem a capacidade de acumular o silício em seus tecidos, como é o caso da maioria das espécies de cereais e gramíneas, como a cana-de-açúcar (SAVANT et al., 1999) (teor de 10 a 30 mg kg⁻¹ na matéria seca). Já as dicotiledôneas, apresentam acúmulo inferior a 5 mg kg⁻¹ na matéria seca (KERBAUY, 2012). Essas plantas são chamadas de acumuladoras e não acumuladoras de silício respectivamente, por diferenças na habilidade de absorção da solução do solo. No caule o silício polimeriza na forma de sílica gel ou opala biogênica (SiO₂.nH₂O), sendo depositado nas paredes celulares e tornando-se imóvel na planta (BALASTA et al., 1989; MA; YAMAJI, 2006).

Essa característica de combinar-se na estrutura da parede faz com que o silício exerça um efeito protetor contra algumas injúrias causados por pragas (GOMES et al., 2009; SILVA et al., 2014) e doenças (LIMA et al., 2010; PEREIRA et al., 2009), proporciona uma arquitetura vegetal mais adequada, com folhas mais eretas (ZANÃO JÚNIOR et al., 2010), maior acúmulo de fitomassa seca, área e espessura foliar (MOREIRA et al., 2010), resultando em maior potencial para produção de fotoassimilados.

Estudos demonstram a capacidade de plantas supridas com silício apresentarem melhores respostas à estresses abióticos, como hídrico (GUNES et al., 2008), salino e fitotoxidez causado por manganês, ferro, zinco e alumínio (MA, 2004). O silício é depositado abaixo da cutícula como dupla camada reduzindo a transpiração do vegetal e já foi verificado aumento na taxa fotossintética pela sua utilização (CURVÊLO et al., 2013). Esses benefícios muitas vezes se manifestam em ganhos de produtividade em culturas anuais, porém parecem ser dependentes de genótipo e forma de aplicação (CRUSCIOL et al.; 2013; GUNES et al., 2008; MOREIRA et al., 2010; PEREIRA JUNIOR et al., 2010;).

2.3 Silício na nutrição do trigo

Alguns estudos já demonstraram o potencial da utilização do silício na nutrição da cultura do trigo. Tavares et al. (2014) obtiveram aumento na

produtividade na cultura do cereal com a adubação silicatada via solo, com fornecimento de 2000 kg ha⁻¹ de silício, nas fontes caulim e cinzas de casca de arroz. Já Domiciano et al. (2010) verificaram que o suprimento de silício utilizando volastonita como fonte, na dose de 1,25 g kg⁻¹ de solo proporcionou menor severidade de mancha-marrom, importante doença da cultura, na folha bandeira.

Foi avaliado também a resposta produtiva do trigo à aplicação de silício fornecido via foliar e os autores não obtiveram resposta nos parâmetros avaliados (MARTIN et al., 2017). Esse resultado mostra que o modo de fornecimento do elemento, assim como a fonte utilizada tem grande impacto na capacidade de utilização do silício pela planta.

Outro estudo mostrou que o fornecimento de silicato de cálcio via solo estimulou a produção de enzimas relacionados ao processo de defesa, e afetou negativamente a preferência e a taxa de reprodução de pulgões submetidos a alimentação com trigo tratado com o silício (GOMES et al., 2005), e, Ali et al. (2012) verificaram que o fornecimento de doses menores de silicato de cálcio fornecidas via solo (75 e 150 mg Si kg⁻¹ de solo), próximo às sementes de trigo foi capaz de mitigar efeitos de estresse salino na cultura. Isso comprova que existe a possibilidade de se obter efeitos positivos do fornecimento de silício sem a necessidade de se utilizar grandes doses com aplicação em área total, o que pode beneficiar e estimular a sua utilização por agricultores.

3 REFERÊNCIAS

- AHMED, M.; KAMRAM, A.; Asif, M.; QADEER, U.; AHMED, Z. I.; GOYAL, A. Silicon priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review. **Australian Journal of Crop Science**, v. 7, p. 484-491, 2013.
- ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S. E; ANDRADE, J. M. V.; SCHEEREN, P. L.; TRINDADE, M. G.; SOARES SOBRINHO, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. B. P.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SOUSA, M. A.; FRONZA, V.; YAMANAKA, C. H. **Trigo BRS 264: cultivar precoce com alto rendimento de grãos indicada para o Cerrado do Brasil Central**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2006. 18p.
- AL-AGHABARY, K.; ZU, Z.; SHI, Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, p. 2101–2115, 2005.
- ALI, A.; BASRA, S. M. A.; HUSSAIN, S.; IQBAL, J. Increased growth and changes in wheat mineral composition through calcium silicate fertilization under normal and saline fields conditions. **Chilean Journal Agricultural Research**, v. 72, p. 98-103, 2012.
- ÁVILA, F. W.; BALIZA, D. P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J. L.; RAMOS, S. J.; Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 184-190, 2010.
- BALASTA, M. L. F. F.; PEREZ, C. M.; JULIANO, B. O.; VILLAREAL, C. P. Effects of sílica level on some properties of *Oryza sativa* straw and hull. **Canadian Journal Botany**, v. 67, p. 2356-2363, 1989.
- BORDES, J.; RAVEL, C.; LE GOUIS J.; LAPIERRE, A.; CHARMET, G.; BALFOURIER, F. Use of a global wheat core collection for association analysis of flour and dough quality traits. **Journal of Cereal Science**, v. 54, p.137-147, 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **A cultura do trigo**. Brasília: Conab, 2017a, 218 p. Disponível em: <www.conab.gov.br>.

- 171 COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB.
172 **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – décimo primeiro**
173 **levantamento.** v.4. Safra 2016/17. n.11. Agosto 2017b. Disponível em:
174 <www.conab.gov.br>
- 175 CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.;
176 NETO, J. F. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e
177 amendoim. **Revista Ciências Agronômicas**, v. 44, p. 404-410. 2013.
- 178 CURVÊLO, C. R. S.; RODRIGUES, F. A.; PEREIRA, L. F.; SILVA, L. C.;
179 DAMATTA, F. M.; BERGER, P. G. Trocas gasosas e estresse oxidativo em
180 plantas de algodoeiro supridas com silício e infectadas por *Ramularia areola*.
181 **Bragantia**, v. 72, p. 346-359. 2013.
- 182 DOMICIANO, G. P.; RODRIGUES, F. A.; MOREIRA, W. R.; OLIVEIRA, H. V.;
183 VALE, F. X. R.; XAVIER FILHA, M. S. Silício no progresso da mancha marrom
184 na folha bandeira do trigo. **Tropical Plant Pathology**, v. 35, p. 186-189, 2010.
- 185 EPSTEIN, E. **Silicon.** Annual Review of Plant Physiology and plant Molecular
186 Biology. v. 50, p. 641-664, 1999.
- 187 FELÍCIO, J. C.; CAMARGO, C. E. O.; MAGNO, C. P. R. S.; GALLO, P. B.;
188 PEREIRA, J. C. V. N. A.; PETTINELLI JUNIOR, A. Avaliação agronômica e de
189 qualidade tecnológica de genótipos de trigo com irrigação por aspersão no
190 estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 55, p.147-156, 1996.
- 191 GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate
192 and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.
193 29, p. 1637-1647, 2006.
- 194 GOMES, F. B.; MORAES, J. C. NERI, D. K. P. Adubação com silício como fator
195 de resistência a insetos-praga e promotor de produtividade em cultura de
196 batata inglesa em sistema orgânico. **Ciências Agrotécnicas**, v. 33, n. 1, p. 18-
197 23, 2009.
- 198 GOMES, F. B.; MORAES, J. C.; SANTOS, C. D.; GOUSSAIN, M. M.
199 Resistance induction in wheat plants by silicone and aphids. **Scientia Agrícola**,
200 v. 62, p. 547-551, 2005.

- 201 GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on
 202 sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms,
 203 and lipid peroxidation. **Communicata Soil Science Plant Anal**, v. 39, p. 1885-
 204 1903, 2008.
- 205 KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan;
 206 2012. 452 p.
- 207 KIM, Y.; KHAN, A. L.; LEE, I. Silicon: a duo synergy for regulating crop growth
 208 and hormonal signaling under abiotic stress conditions. **Critical Reviews in**
 209 **Biotechnology**, v. 36, p. 1099-1109, 2016.
- 210 KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; CORRÊA, G. H.
 211 Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de
 212 arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, p. 635–641,
 213 1999.
- 214 LIMA, L. M; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; FONSECA, T. A. P. S.;
 215 CARVALHO, J. G. Quantificação da ferrugem asiática e aspectos nutricionais
 216 de soja suprida com silício em solução nutritiva. **Summa Phytopathology.**, v.
 217 36, p. 51-56, 2010.
- 218 MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and
 219 abiotic stresses. **Soil and Science Plant Nutrition**, v. 50, p.11-18, 2004.
- 220 MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends**
 221 **Plant Science**, v. 11, p. 392–397, 2006.
- 222 MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo:
 223 Agronômica Ceres; 2006. 631 p.
- 224 MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. II. The adsorption of monosilicic
 225 acid by soil and by other substances. **Canadian Journal Soil Science**, v. 43, n.
 226 1, p. 83-95, 1963.
- 227 MARTIN, T. N.; NUNES, U. R.; STECCA, D. L.; PAHINS, D. B. Foliar
 228 application of silicone on yield componentes of wheat crop. **Revista Caatinga**,
 229 v. 30, p. 578-585, 2017.

- 230 MOREIRA, A. R.; FAGAN, E. B.; MARTINS, K. V.; SOUZA, C. H. E. Resposta
231 da cultura da soja a aplicação de silício foliar. **Bioscience Journal**, v. 26, p.
232 413-423, 2010.
- 233 NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutriente
234 use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter
235 wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, 2017
- 236 PEREIRA, S. C.; RODRIGUES, F. A.; CARRÉ-MISSIO, V.; OLIVEIRA, M. G.
237 A.; ZAMBOLIM, L. Aplicação foliar de silício na resistência da soja à ferrugem e
238 na atividade de enzimas de defesa. **Tropical Plant Pathology**, v. 34, p. 164-
239 170, 2009.
- 240 PEREIRA JÚNIOR, P.; REZENDE, P. M.; MALFITANO, S. C.; LIMA, R. K.;
241 CORRÊA, L. V. T.; CARVALHO, E. R. Efeito de doses de silício sobre a
242 produtividade e características agrômicas da soja (*Glycine max* L. Merrill).
243 **Ciências agrotécnicas**, v. 34, p. 908-913, 2010.
- 244 PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da Escória de**
245 **Siderurgia no Brasil: Estudos na Cultura da Cana-de-açúcar**. FUNEP,
246 Jaboticabal. 2001.
- 247 SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.
248 Silicon nutrition and sugarcane production: **A review. Journal of Plant**
249 **Nutrition**, v. 22, p. 1853-1903, 1999.
- 250 SILVA, M. S. **Trigo no Brasil começa nos Cerrados**. Anuário Brasileiro do
251 Trigo. Passo Fundo, v. 1, n. 1, 2001. 114 p.
- 252 SILVA, A. A.; ALVARENGA, R.; MORAES, J. C.; ALCANTRA, E. Biologia de
253 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) em algodoeiro de
254 fibra colorida tratado com silício. **Entomobrasilis**, v. 7, n. 1, p. 65-68, 2014.
- 255 SILVA, M. R. R.; ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F. Cultivares de trigo sob
256 manejos de solo e água, na região de cerrado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4,
257 p.921-927, 2008.
- 258 TAVARES, L. C.; FONSECA, D. A. R.; RUFINO, C. A.; OLIVEIRA, S.;
259 BRUNES, A. P.; VILLELA, F. A. Adubação silicatada em trigo: rendimento e

- 260 qualidade de sementes. **Revista de la Facultad de Agronomia**, v. 113, p. 94-
261 99, 2014.
- 262 ZANÃO JÚNIOR, L. A.; FONTES, R. L. F.; NEVES J. C. L.; KORNDÖRFER, G.
263 H.; ÁVILA, V. T. Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and
264 silicon. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, p.1629-1639, 2010.

APLICAÇÃO LOCALIZADA DE SILÍCIO NA CULTURA DO TRIGO

Resumo: O silício como alternativa para potencializar mecanismos bioquímicos e estruturais das plantas tem sido estudado com resultados promissores. Objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de doses de nanosílica e silicato de sódio no teor de silício e variáveis nutricionais e fisiológicas da cultura do trigo. O experimento foi conduzido em ambiente protegido e em vasos, com delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, no fatorial 2 x 4, sendo fontes (nanosílica e silicato de sódio) e doses de silício (0, 150, 300 e 450 g ha⁻¹). Foram avaliados o teor foliar de silício, nitrogênio, fósforo e potássio e a fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração de plantas de trigo. A nanosílica aumentou o teor foliar de silício, nitrogênio e fósforo em 59%, 9,3% e 5%, respectivamente, mas reduziu a fotossíntese em até 29% em relação ao controle. Conclui-se que as fontes testadas promovem maior teor foliar de Si para o trigo, com destaque para a nanosílica. O fornecimento de nanosílica proporciona maior teor foliar de nitrogênio e fósforo, ao contrário do silicato de sódio, mas não altera o teor de potássio. No entanto um alto teor deste elemento limita a condutância estomática e a transpiração, reduzindo a fotossíntese.

Palavras-chave: elemento benéfico, fotossíntese, nanosilica, silicato de sódio

SILICON APPLIED TO WHEAT SEEDING FURROWS

Abstract: Silicon as an alternative to potentiate plant metabolism has been studied with promising results. The aim was to evaluate the effect of nanosilica and sodium silicate applied in the furrow on the silicon content and nutritional and physiological parameters. The experiment was conducted under protected environment in pots and consisted of a randomized blocks design and four replicates, 2 x 4 factorial was used, corresponding to sources (nanosilica and sodium silicate) and doses (0, 150, 300 and 450 g ha⁻¹). Were evaluated the silicon, nitrogen, phosphorus and potassium leaf content and photosynthesis, stomatal conductance and transpiration of wheat plants. The nanosilica increased the silicon, nitrogen and phosphorus leaf content in 59%, 9,3% and 5% respectively, but reduced the photosynthesis by 29% in relation to control. Was concluded that the sources tested provide bigger silicon leaf content, in particular the

297 nanosilica. The nanosilica supply provide bigger nitrogen and phosphorus leaf content,
298 instead the sodium silicate, but doesn't change the potassium content. However, a great
299 silicone content limits the conductance stomatal and transpiration reducing the
300 photosynthesis.

301 **Keywords:** beneficial element, photosynthesis, nanosilica, sodium silicate
302

INTRODUÇÃO

O silício é estudado na agricultura por ser um elemento benéfico, assim possui o potencial de trazer diversas melhorias aos vegetais. Nas vantagens da sua utilização pela planta está a proteção a diversos estresses abióticos, como seca e salinidade, devido ao incremento de compostos de defesa e antioxidantes (Ahmed et al., 2013). O envolvimento com outros fatores metabólicos também está sendo estudado, como a interação com hormônios e outros sinalizadores (Kim et al., 2016).

O Si também provoca alterações nas estruturas das folhas, pela forma com que se deposita nos tecidos, principalmente junto as paredes celulares de células da epiderme, oferecendo maior resistência mecânica e menor transpiração cuticular (Gao et al., 2006). Em arroz, verificou-se benefícios no seu uso pelas plantas na captação da radiação solar, com incrementos na fotossíntese (Epstein, 1999), além de melhorias na eficiência do fotossistema de plantas de tomate (Al-Aghabary et al., 2005), mostrando exercer efeitos sobre diferentes espécies. No entanto, o seu fornecimento deve seguir critérios pois podem acarretar no desequilíbrio nutricional das plantas (Neu et al., 2017) e do solo (Karunakaran et al., 2013).

O trigo é uma planta não acumuladora de Si ($< 10 \text{ mg g}^{-1}$ de Si na matéria seca), mas possui proteínas transportadoras que possibilitam sua absorção (Rains et al., 2006). O fornecimento de Si no sulco em doses baixas pode ser interessante para aperfeiçoar a utilização desse elemento em culturas anuais, que estão expostas a diversas condições ambientais. Assim busca-se a utilização de fontes mais eficientes e solúveis, como as nano partículas de Si e silicatos solúveis, estes normalmente utilizados em aplicações foliares, com resultados satisfatórios (Maghsoudi et al., 2015).

A utilização de nano partículas na agricultura é recente, mas trabalhos têm demonstrado ser uma alternativa potencialmente favorável para a nutrição de plantas. A sua capacidade em fornecer o Si via solo para plantas já foi comprovada em arroz (Alvarez et al., 2018), milho (Suriyaprabha et al., 2012). Também forneceu o elemento para o trigo (Neu et al., 2017), porém em substrato de areia. É importante dessa forma verificar o comportamento das nano partículas em solos com maior carga eletrônica, como solos argilosos de cerrado, verificando possíveis interações com os nutrientes e componentes originais.

Este trabalho considera que o Si pode ser fornecido para a cultura do trigo no sulco de plantio em baixas doses, e que seu acúmulo nos tecidos resulta em mudanças nos aspectos nutricionais e fisiológicos da cultura. Dessa forma, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de doses de nanosílica e silicato de sódio no teor de Si e variáveis nutricionais e fisiológicas da cultura do trigo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Federal de Chapadão do Sul, Brasil, em ambiente protegido. O clima da região é classificado segundo método de Köppen como tropical úmido, com temperaturas anuais entre 13 e 29°C e precipitação pluviométrica média de 1850 mm, com as chuvas concentradas no verão (Cunha et al., 2013).

A maior temperatura registrada durante o período do experimento foi de 44°C e a de 5°C a mais baixa, ocorrendo ainda 37 dias com temperaturas superiores a 40°C (Figura 1). A temperatura ideal para o desenvolvimento vegetativo ocorre entre 20 a 25°C (Scheeren et al., 2000).

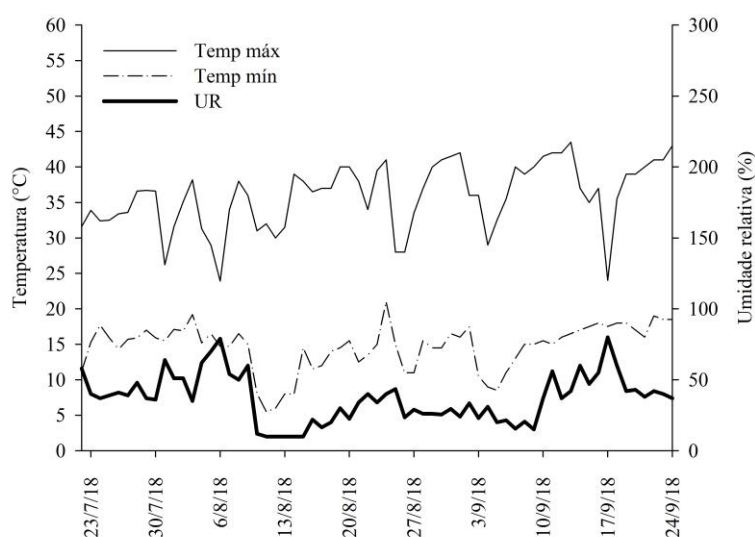


Figura 1. Temperaturas máxima, mínima e umidade relativa do ar durante o período de cultivo. Chapadão do Sul.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, constituído pelo esquema fatorial 2 x 4, sendo duas fontes de Si e quatro doses, com quatro repetições. Os tratamentos foram: nanosílica (77 g L⁻¹ de Si e tamanho de partículas 70% < 100 nm) e o silicato de sódio (150 g L⁻¹ de Si), fornecendo Si nas doses de 0, 150; 300 e 450 g ha⁻¹, aplicado no sulco de semeadura.

Utilizou-se um Latossolo Vermelho distrófico, classificado segundo metodologia de Santos et al. (2018), de textura argilosa, com 45% de argila, 10% de silte e 45% de areia. Foram encontrados na análise química valores de pH (CaCl₂) de 5,1; CTC de 6,3 cmol_c dm⁻³; Ca e Mg com 1,0 e 0,6 cmol_c dm⁻³; K e P (mel) com 86,0 e 9,8 mg dm⁻³; e S e B com 7,9 e 0,18 mg dm⁻³, além de Cu (mel), Fe (mel), Mn (mel) e Zn (mel) com 0,5; 54; 6,3 e 2,2 mg dm⁻³ respectivamente. O teor de Si no solo utilizado foi de 6,6 mg dm⁻³, obtido segundo Korndörfer (2004) e é considerado baixo para este tipo de solo (Tokura et al. 2007).

O solo foi coletado em uma área agrícola dentro da Universidade, peneirado e alocado em vasos completando 7 dm^{-3} , medidos na proveta de 1 dm^{-3} . Aplicou-se calcário (PRNT 90%; CaO 31% e MgO 21%) em cada vaso, para elevação da saturação de bases a 70%. O solo foi remexido para homogeneizar o calcário com ajuda de baldes e permaneceu por 90 dias para reações. Durante esse período foi mantido descoberto e úmido através de irrigação manual.

A adubação foi fornecida para equilibrar os teores de P para 200 mg dm^{-3} antes da semeadura, 150 mg dm^{-3} de K (60 mg dm^{-3} na semeadura e restante aos 23 dias após a emergência - DAE), além de 200 mg dm^{-3} de N (20 mg dm^{-3} antes da semeadura, 90 mg dm^{-3} aos 22 e 45 DAE), seguindo recomendações de Pietro-Souza et al. (2013). As fontes foram superfosfato simples, cloreto de potássio e uréia, respectivamente. Foram ainda adicionados antes da semeadura Zn, B, e Mn nas doses de 10,0; 0,5 e 5,0 mg dm^{-3} , das fontes cloreto de zinco, ácido bórico, e sulfato de manganês, respectivamente.

Foi retirada uma camada de solo de 5 cm, e aplicou-se a solução através de um pulverizador manual, a 5 cm de profundidade, para simular a aplicação no sulco, com vazão calculada de 200 L ha^{-1} . O solo retirado foi repostado e as sementes de trigo semeadas a 2 cm de profundidade.

Foi utilizado a variedade de trigo IAC 389, com oito plantas por vaso após desbaste. No florescimento pleno, aos 65 DAE foram realizadas as análises fisiológicas e coleta de folhas. A taxa de fotossíntese líquida, a condutância estomática e a transpiração foram medidas na folha-bandeira de uma planta por vaso. Utilizou-se o IRGA com taxa de fluxo de fótons de $1200 \mu\text{mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e para CO_2 de $380 \mu\text{mols m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. As medições foram realizadas entre as 9h e 11h.

Para a análise de conteúdo foliar de Si, N, P e K, foram coletadas as 4 folhas superiores, incluindo a folha bandeira, seguindo recomendações de Malavolta (1997).

Então foram lavadas com água destilada, em solução de detergente (0,1%) e ácido clorídrico diluído (0,3%), enxaguadas novamente e secas posteriormente em estufa a 65°C. As amostras foram moídas e analisou-se o teor de Si foliar segundo o método proposto por Korndörfer et al (2004) e os teores de N, P e K segundo Bataglia et al. (1983).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos de fontes de silício foram comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade, e os efeitos das doses de silício foram avaliados por meio de análise de regressão, tendo se utilizado como critério para escolha do modelo, a magnitude dos coeficientes de regressão, significativos a 5% de probabilidade pelo teste F.

RESULTADOS

O teor de Si nas folhas do trigo foi alterado pelo fornecimento de ambas as fontes (Figura 2). A nanosílica foi mais absorvida e acumulada nos tecidos, com máximo teor observado na dose de 377 mg dm⁻³, correspondendo a 0,38% de Si na MS de folhas. Para o silicato de sódio o fornecimento aumentou o teor foliar até a dose máxima testada, representando 0,32% de Si na MS. Os ganhos em relação a testemunha foram de 59% e 33% para nanosílica e silicato de sódio, respectivamente.

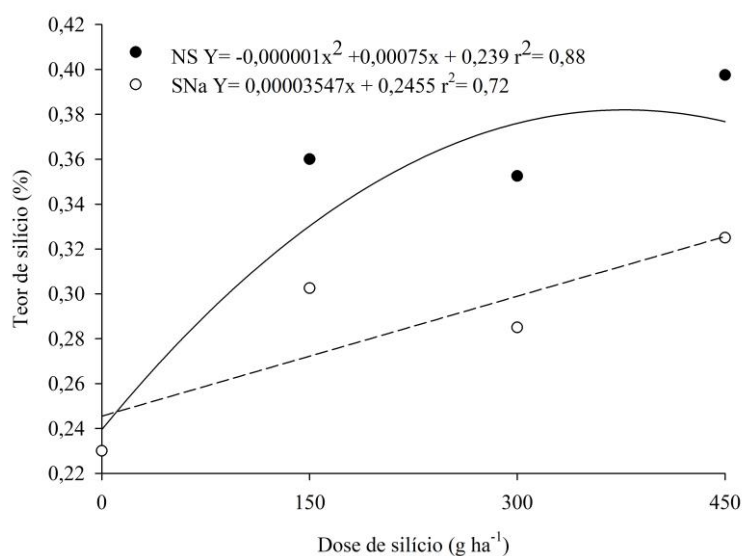


Figura 2. Teor de silício em folhas de trigo sob fornecimento de doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

O teor de nitrogênio encontrado nos tratamentos foi bastante distinto (Figura 3). A nanosílica incrementou o teor de N até a dose máxima testada, sendo 9,3 % maior que o controle. Com efeito oposto o silicato de sódio reduziu o teor do nutriente em 15 % em relação ao controle, na dose aproximada de 266 mg dm⁻³.

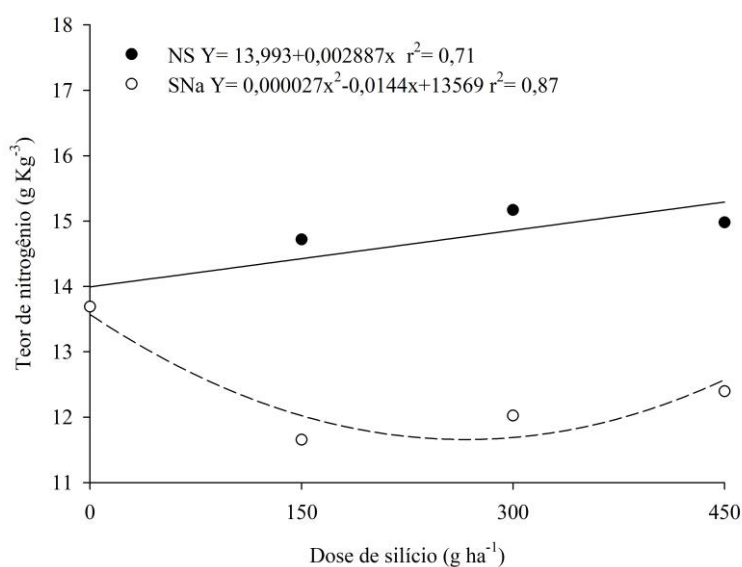


Figura 3. Teor de nitrogênio em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

A nanosílica proporcionou ganho no teor de fósforo de folhas de trigo, aumentando até 5% o teor do nutriente em relação ao controle, na dose de 156 mg dm⁻³. No tratamento com o silicato de sódio, o teor de P acabou reduzido em até 16% em relação ao controle (Figura 4).

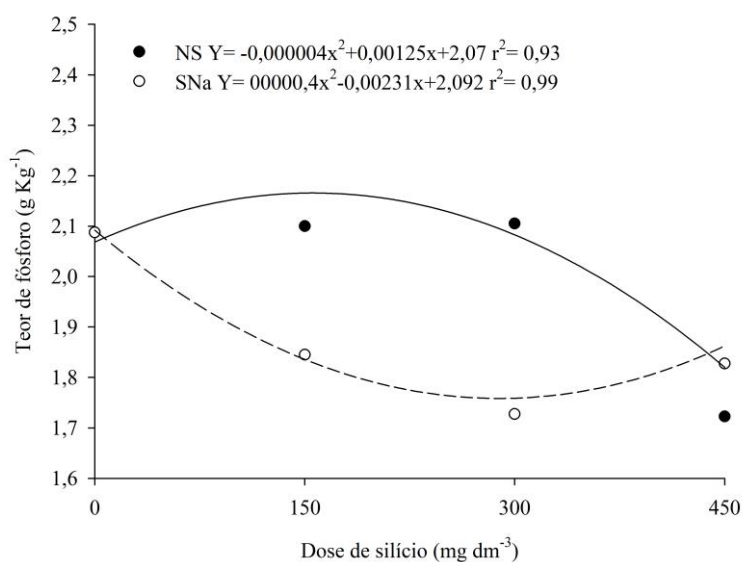


Figura 4. Teor de fósforo em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

O fornecimento de ambas as fontes de Si não afetou o teor foliar de K nas plantas de trigo (Figura 5).

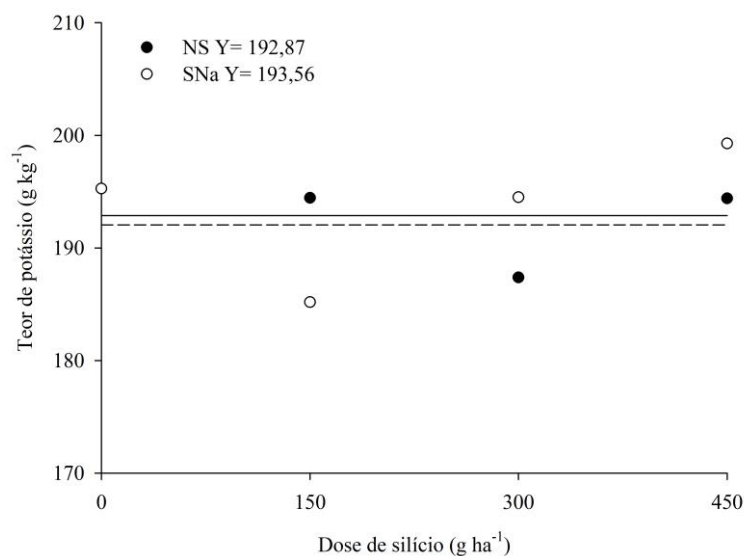


Figura 5. Teor de potássio em folhas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

A taxa fotossintética foi afetada pelo fornecimento de Si (Figura 6). A dose de Si que proporcionou a menor assimilação de CO₂ foi de 312 mg dm⁻³ de solo, correspondendo a 14,72 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, na fonte nanosílica, uma redução de 29% em relação ao controle. A mesma queda ocorreu no fornecimento de silicato de sódio, porém a redução foi gradual até a dose máxima fornecida, sendo 22% menor que o controle.

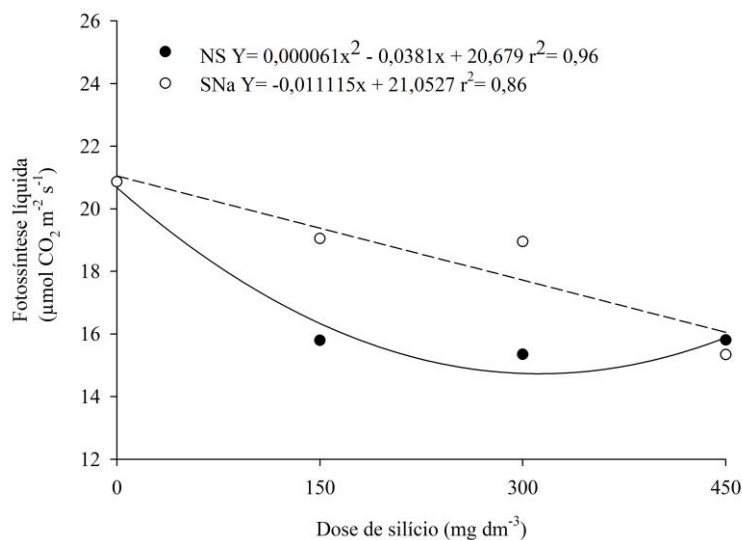


Figura 6. Taxa de fotossíntese líquida de plantas de trigo sob fornecimento de doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

O fornecimento de Si reduziu a condutância estomática das plantas de trigo (Figura 7). Para a fonte nanosílica, a queda ocorreu até a dose de 312 mg dm⁻³ de solo, com condutância estimada de 0,19 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹. A maior dose fornecida de silicato de sódio proporcionou a menor condutância, com 0,21 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹.

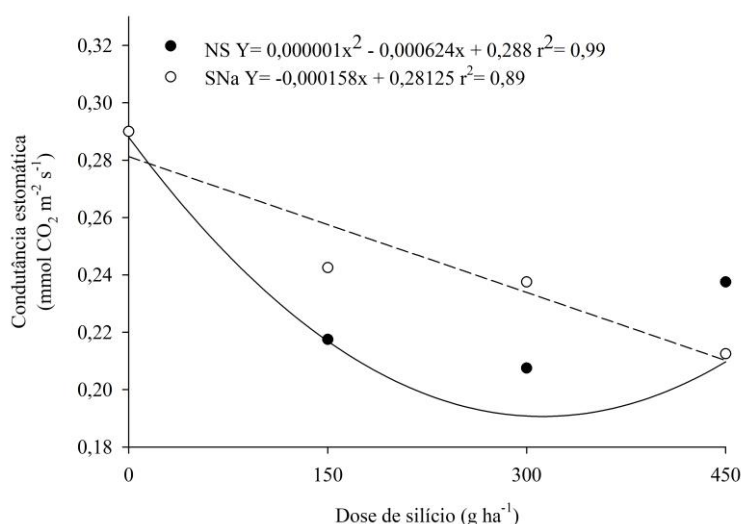


Figura 7. Condutância estomática de plantas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

O fornecimento de Si reduziu a transpiração das plantas (Figura 8). A fonte nanosílica teve redução de 27% em relação ao controle, na dose de Si de 293 mg dm⁻³ de solo. Para a fonte silicato de sódio, a menor taxa de transpiração ocorreu na dose máxima testada, com 5,6 mmol H₂O m⁻² s⁻¹, sendo 20% menor que o controle.

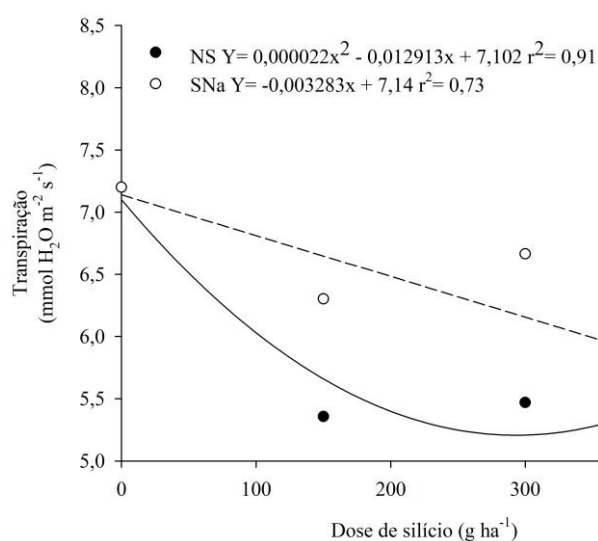


Figura 8. Transpiração de plantas de trigo submetidas a doses de nanosílica (NS) e silicato de sódio (SNa).

DISCUSSÃO

As plantas foram capazes de absorver e translocar o Si de ambas as fontes, com destaque a nanosílica utilizada (Figura 2). O fornecimento de Si para plantas utilizando fontes como o silicato de sódio que já é conhecido, mas a utilização de nanosilica para cereais ainda é pouco relatada. Casos de sucesso foram encontrados em arroz (Alvarez et al. 2018), milho (Suriyaprabha et al. 2012) e até em trigo (Neu et al. 2017), porém como o Si reage muito com o solo, a sua eficácia deve ser avaliada em diferentes ocasiões.

O maior teor de Si nos tecidos foliares acarretou em menor teor de N nas folhas de plantas de trigo (Figura 3), o que pode ser explicado pela menor transpiração (Figura 8), prejudicando o transporte através do fluxo em massa. Essa correlação foi estudada por Jauregui et al. 2015 em trigo submetido a altas temperaturas, o que reflete com exatidão

a resposta ocorrida na utilização do nitrato de sódio. No entanto, a nanosílica teve comportamento oposto, com maior acúmulo do N.

Em outro estudo, a utilização do silicato de sódio no solo indicou que no processo de liberação do ácido silícico ocorre uma alteração no pH do solo que recebeu o produto, resultando em alteração na flora microbiana e na disponibilização de nutrientes. Dessa forma, o silicato de sódio mostrou exercer toxicidade sobre microorganismos, o que não ocorreu quando utilizado a fonte nanosílica (Karunakaran et al. 2013). Sabe-se que o nitrogênio é um nutriente que tem sua disponibilidade fortemente afetada pelas condições do solo e da biomassa microbiana, como mostra o estudo anteriormente citado.

Encontrou-se também maior conteúdo foliar de fósforo em plantas de trigo supridas com nanosílica (Figura 4), o que já foi verificado no estudo de Neu et al. 2017. O silício e o fósforo não possuem os mesmos sítios de absorção pelas plantas, mas competem entre si por sítios de adsorção em óxidos de ferro e alumínio, liberando mais P para a solução do solo (Seyfferth e Fendorf, 2012).

Segundo Ahmed et al. (2013), a disponibilização do Si na solução do solo é afetada pela fonte utilizada, sendo que as mais solúveis e puras são mais eficientes e rápidas em oferecer o ácido silícico, forma absorvida pelas plantas. Como mencionado anteriormente, o silicato de sódio necessita ser alterado para a liberação do ácido silícico, processo dispensado pela nanosílica.

Ao contrário dos conteúdos foliares de N e P, o K não foi afetado por nenhuma das fontes e doses testadas (Figura 5). Esse resultado difere do obtido por Mali e Aery (2008), quando na utilização de metasilicato de sódio observaram alteração no conteúdo foliar de K, com aumento até a dose de 100 ppm de Si e posterior redução em doses maiores.

A absorção de K nas raízes é um processo ativo, mediada por uma H⁺ ATPase. Dessa forma, uma maior absorção de K observada no trabalho anterior foi relacionada a maior ativação dessa proteína transmembrana pelo suprimento de Si (Liang, 1999). O K é envolvido no processo de regulação estomática, o que impacta diretamente a transpiração da planta. Como nesse estudo não ocorreram diferenças no acúmulo de K, a redução da condutância estomática (Figura 7) e consequentemente transpiração foram advindos do acúmulo do silício nos tecidos epidérmicos.

A fotossíntese (Figuras 6) sofreu queda provavelmente pela redução da condutância estomática, assim como a transpiração. Esse comportamento já foi verificado no trabalho de Barros et al. (2018), em que a redução da condutância estomática foi acompanhada da maior deposição de Si nos tecidos foliares.

O Si quando chega as folhas, por força da transpiração, polimeriza nos tecidos formando cadeias grandes de ácido polisilícico, que reduzem a flexibilidade da parede dos estômatos (Luz et al. 2006). Gao et al. (2006) estudando milho, verificaram que o tecido celular que recebe Si torna-se mais espesso, e isso acontece com predominância nas células epidérmicas, e sugere que o Si exerceu uma regulação da abertura estomática. Isso acarreta na redução da oferta de CO₂ e da taxa fotossintética.

O nível da abertura estomática modifica também como consequência a transpiração, sendo que esta participa da regulação térmica das plantas e permite a absorção e o particionamento de nutrientes. Segundo Araus et al. (2003) uma das principais funções da transpiração nos cereais é o resfriamento das folhas. Isso significa que comparando plantas semelhantes quanto a sua fenologia, aquelas que apresentam maior depressão de temperatura do dossel são as que transpiram mais. Isso é utilizado para a seleção de matérias mais resistentes ao calor.

Quando analisado as condições climáticas no cultivo (Figura 1), verifica-se temperaturas acima das recomendadas para a cultura, atingindo valores acima de 40°C. Pimentel et al. (2015) observaram que o trigo submetido a temperatura máxima de 30°C já apresentou queda no rendimento. Os problemas causados pela alta temperatura impactam diretamente no mecanismo fotossintético da planta.

O estresse por calor gera radicais oxidativos reativos que danificam os fotossistemas I e II (Essemine et al. 2010). Como o impacto da redução da condutância estomática causou também redução da transpiração, reduziu-se um mecanismo para resfriamento da própria planta, sobrecarregando o fotossistema.

O Si como elemento benéfico, é capaz de estimular a produção de diversas moléculas antioxidantes, como mostra o estudo de Alzahrani et al. (2018), além de melhorar a condição hídrica de folhas de trigo submetidos a seca, assim como a fotossíntese. No presente estudo, a condição de estresse que ocorreu para as plantas foi o estresse por calor, ou seja, a perda de água nesse caso não seria um desperdício, mas sim uma forma de proteção contra os danos causados pelo calor.

Os resultados deste estudo nos fornecem a conclusão que as fontes testadas promovem maior teor foliar de Si para o trigo, com destaque para a nanosílica. O fornecimento de nanosílica proporciona maior teor foliar de nitrogênio e fósforo, ao contrário do silicato de sódio, mas não altera o teor de potássio. No entanto um alto teor deste elemento limita a condutância estomática e a transpiração, reduzindo a fotossíntese.

REFERÊNCIAS

- 550 Ahmed, M.; Kamram, A.; Asif, M.; Qadeer, U.; Ahmed, Z. I.; Goyal, A. Silicon
551 priming: a potential source to impart abiotic stress tolerance in wheat: A review.
552 Australian Journal of Crop Science, v. 7, p. 484-491, 2013.
- 553 Al-Aghabary, K.; Zu, Z.; Shi, Q. Influence of silicon supply on chlorophyll content,
554 chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt
555 stress. Journal of Plant Nutrition, v. 27, p. 2101–2115, 2005.
- 556 Alvarez, R. de C. F.; Prado, R. de M.; Felisberto, G.; Fernandes Deus, A. C.; Lima
557 de Oliveira, R. L. Effects of soluble silicate and nanosilica application on rice nutrition
558 in na oxisol. Pedosphere, v. 28, p. 597-606, 2018.
- 559 Alzahrani, Y.; Kusvuran, A.; Alharby, H. F.; Kusvuran, S.; Rady, M. M. The
560 defensive role of silicone in wheat against stress conditions induced by drought, salinity
561 or cádmium. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 154, p. 187-196, 2018.
- 562 Araus J. L.; Bort, J.; Steduto, P.; Villegas, D.; Royo, C. Breeding cereals for
563 Mediterranean conditions: ecophysiological clues for biotechnology application. Annals
564 of Applied Biology, v. 142, p. 129-141, 2003.
- 565 Barros, T. C.; Prado, R. de M.; Roque, C. G.; Barzotto, G. R.; Wassoloswki, C. R.
566 Silicon and salicylic acid promote diferente responses in legume plants. Journal of Plant
567 Nutrition, p. 01-10, 2018.
- 568 Bataglia, O. C.; Furlani A. M. C.; Teixeira J. P. F. Furlani P. R.; Gallo J. R. Métodos
569 de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. p.48.
- 570 Cunha, F. F. da; Magalhães, F. F.; Castro, M. A. de. Métodos para estimativa da
571 evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul – MS. Engenharia na
572 Agricultura, v. 21, p. 159-172, 2013.
- 573 Epstein, E. Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology
574 v. 50, p. 641–664, 1999.

- 575 Essemine, J.; Ammar, S.; Bouzid, S. Impact of heat stress on germination and growth
576 in higher plants: Physiological, biochemical and molecular repercussions and
577 mechanisms of defense. *Journal of Biological Sciences*, v. 10, p. 565-572, 2010.
- 578 Gao, X.; Zou, C.; Wang, L.; Zhang, F. Silicon decreases transpiration rate and
579 conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 29, p. 1637-
580 1647, 2006.
- 581 Jauregui, I.; Aroca, R.; Garnica, M.; Zamarreño, A. M.; García-Mina, J. M.; Serret,
582 M. D.; Parry, M.; Irigoyen, J. J.; Aranjuelo, I. Nitrogen assimilation and transpiration:
583 key processes conditioning responsiveness of wheat to elevated [CO₂] and temperature.
584 *Physiologia Plantarum*, v. 155, p. 338-354, 2015.
- 585 Karunakaran, G.; Suriyaprabha, R.; Manivasakan, P.; Yuvakkumar, R.; Rajendran,
586 V.; Prabu, P.; Kannan, N. Effect of nanosilica and silicon sources on plant growth
587 promoting rhizobacteria, soil nutrients and maize seed germination. *IET*
588 *Nanobiotechnology*, v. 7, n. 3, p. 70-77, 2013.
- 589 Kim, Y.; Khan, A. L.; Lee, I. Silicon: a duo synergy for regulating crop growth and
590 hormonal signaling under abiotic stress conditions. *Critical Reviews in Biotechnology*,
591 v. 36, p. 1099-1109, 2016.
- 592 Korndörfer, G. H. *Análise de silício: Solo, planta e fertilizante*. 2^aed. Uberlândia:
593 GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34p.
- 594 Liang, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium
595 concentration in barley under salt stress. *Plant and Soil*, v. 209, p. 217-224, 1999.
- 596 Luz, J. M. Q.; Guimarães, S. T. M. R.; Korndörfer, G. H. Hidroponic production of
597 lettuce in hidroponic solution with or without silicon. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p.
598 295-300, 2006.

- 599 Maghsoudi, K.; Emam, Y.; Ashraf, M. Influence of foliar application of silicon on
600 chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat
601 cultivars differing in drought tolerance. Turkish Journal of Botany, v. 39, p. 625-634,
602 2015.
- 603 Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das
604 plantas: Princípios e aplicações. 2ªed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- 605 Mali, M.; Aery, N. C. Influence of Silicon on Growth, Relative Water Contents and
606 Uptake of Silicon, Calcium and Potassium in Wheat Grown in Nutrient Solution.
607 Journal of Plant Nutrition, v. 31, p. 1867-1876, 2008.
- 608 Neu, S.; Schaller, J.; Dudel, E. G. Silicon availability modifies nutrient use
609 efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat
610 (*Triticum aestivum* L.). Scientific Reports, v. 7, 2017.
- 611 Pietro-Souza, W.; Bonfim-Silva, E. M.; Schlichting, A. F.; Silva, M. de C.
612 Desenvolvimento inicial de trigo sob doses de nitrogênio em Latossolo Vermelho de
613 Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 6; p. 575-580,
614 2013.
- 615 Pimentel, A. J. B.; Rocha, J. R. do A. S de C.; Souza, M. A. de.; Ribeiro, G.; Silva,
616 C. R.; Oliveira, I. C. M. Characterization of heat tolerance in wheat cultivars and effects
617 on production components. Revista Ceres, v. 62, p. 191-198, 2015.
- 618 Rains, D. W.; Epstein, E.; Zasoski, R. J.; Aslam, M. Active silicon uptake by wheat.
619 Plant and Soil, v. 280, p. 223-228, 2006.
- 620 Santos, H. G. dos; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C. dos; Oliveira, V. A. de;
621 Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A. de; Araujo Filho, J. C. de; Oliveira, J.
622 B. de; Cunha, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5ªed. Brasília, DF:
623 Embrapa, 2018. 356p.

- 624 Scheeren, P. L.; da Cunha, G. R.; de Quadros, F. J. S.; Martins, L. F. Efeito do frio
625 em trigo. Embrapa Trigo, Comunicado Técnico Online, nº57, 2000.
- 626 Seyfferth, A. L.; Fendorf, S. Silicate Mineral Impacts on the Uptake and Storage of
627 Arsenic and Plant Nutrients in Rice (*Oryza sativa* L.). Environmental Science &
628 Technology, v. 46, p. 13176-13183, 2012.
- 629 Suriyaprabha, R.; Karunakaran, G.; Yuvakkumar, R.; Prabu, P.; Rajendran, V.;
630 Kannan, N. Growth and physiological responses of maize (*Zea mays* L.) to porous sílica
631 nanoparticles in soil. Journal of Nanoparticle Research, v. 14, 2012.
- 632 Tokura, A. M.; Furtini Neto, A. E.; Curi, N.; Carneiro, L. F.; Alovisei, A. A. Silício e
633 fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. Acta Scientiarum
634 Agronomica, v. 29, p. 9-16, 2007.